

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОДУКТА В АППАРАТЕ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

**OPTIMUM SPEED OF DIAGRAMS FOR CHANGES OF TEMPERATURE OF A PRODUCT IN THE DEVICE OF AIR COOLING**

Сингаевский Николай Алексеевич  
д.т.н., профессор  
*Кубанский государственный аграрный университет,  
Краснодар, Россия*

Singaevskii Nikolai Alekseevitch  
Dr.Sci.Tech., professor  
*Kuban State Agrarian University,  
Krasnodar, Russia*

Добробаба Юрий Петрович  
к.т.н., профессор  
*Кубанский государственный технологический  
университет, Краснодар, Россия*

Dobrobaba Yurii Petrovitch  
Cand.Tech.Sci., professor  
*Kuban State Technological University,  
Krasnodar, Russia*

Шаповало Анатолий Антонович  
соискатель  
*Начальник отдела развития и реконструкции объектов  
энергетики Управление энергетики "ОАО Газпром",  
Москва, Россия*

Shapovalo Anatolii Antonovitch  
applicant for degree  
*Head of development and reconstruction of  
Energy Office of Energy JSCO "Gazprom", Mos-  
cow, Russia*

Разработаны три диаграммы изменения температуры продукта в аппаратах воздушного охлаждения с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее различных производных при разгоне и торможении. Определены параметры оптимальных по быстродействию диаграмм изменения температуры продукта в аппаратах воздушного охлаждения

Three diagrams are developed for the changes of temperature of a product in air cooling devices with restrictions of speed of the systems' performing parts of electric drive and it's various derivatives at dispersal and braking. Parameters of optimum diagrams of speed for the big changes of temperature of a product in devices of air cooling are defined

Ключевые слова: ДИАГРАММА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОДУКТА; АППАРАТ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ; ПАРАМЕТРЫ ДИАГРАММЫ

Keywords: DIAGRAM OF CHANGE OF TEMPERATURE OF PRODUCT, DEVICE OF AIR COOLING, DIAGRAM PARAMETERS

Аппараты воздушного охлаждения используются в нефтегазовой промышленности для конденсации и охлаждения парообразных, газообразных и жидких сред. Аппараты воздушного охлаждения обеспечивают охлаждение природного газа на дожимных компрессорных станциях газовых промыслов и на компрессорных станциях магистральных газопроводов. В процессе сжатия газ нагревается, поэтому возникают температурные перепады на участках магистрального газопровода. Это приводит к температурным напряжениям, деформации трубопровода, снижению качества гидроизоляции и т.д. Для устранения температурных напряжений осуществляется охлаждение газа аппаратами воздушного охлаждения (температура снижа-

ется путем вентиляторного обдува пучков труб с газом наружным воздухом до нормального значения). С другой стороны, охлаждение приводит к снижению средней температуры газа на участке трубопровода, что обуславливает уменьшение гидравлического сопротивления газопровода и, как следствие, повышение его пропускной способности при постоянных затратах энергии или при неизменной производительности уменьшение затрат энергии. Следовательно, экономичность работы магистрального газопровода зависит от оптимальности его температурного режима. Так как температура воздуха и режим работы газопровода изменяются, то необходимо регулировать параметры аппарата воздушного охлаждения, характеризующие режим охлаждения. Это достигается изменением количества работающих вентиляторов. Такой способ охлаждения газа является энергозатратным.

В настоящее время для эффективного охлаждения продукта в аппарате воздушного охлаждения регулируют скорость исполнительных органов вентиляторов. При этом электрический привод вентиляторов выполняется по схеме “преобразователь частоты – асинхронный двигатель”.

Силовая часть электротехнической системы аппарата воздушного охлаждения представлена системой дифференциальных уравнений четвертого порядка, так как учитываются: постоянная времени, характеризующая динамику тепловых процессов в аппарате; электромеханическая постоянная времени электропривода; электромагнитная постоянная времени статорных цепей двигателя; электромагнитная постоянная времени роторных цепей двигателя.

При охлаждении продукта в аппарате воздушного охлаждения необходимо сначала увеличить скорость исполнительного органа электропривода вентилятора, а затем ее уменьшить. Так как математическая модель электропривода вентилятора представляет собой систему дифференциальных уравнений третьего порядка, то скачкообразное изменение величины напряжения и его частоты приводит к скачкообразному изменению вели-

чины третьей производной скорости вентилятора. Поэтому для реализации оптимальных по быстродействию диаграмм изменения температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения предлагается формировать зависимость третьей производной скорости исполнительного органа электропривода вентилятора.

На электропривод вентилятора накладываются технические ограничения по скорости исполнительного органа и ее первой (ускорение) и второй (рывок) производным.

Так как система имеет локальные ограничения, то управляющее воздействие, в соответствии с принципом максимума академика Л.С. Понтрягина, представляет собой кусочно-постоянную функцию от времени, принимающую граничные значения.

Так как характеристическое уравнение силовой части электропривода вентилятора имеет третий порядок, корни которого действительные, то, в соответствии с теоремой об  $N$  интервалах А.А Фельдбаума, изменить оптимально по быстродействию скорость исполнительного органа электропривода вентилятора возможно минимум за три этапа.

Кроме того, система оптимального по быстродействию изменения продукта в аппарате воздушного охлаждения позволит при аварийном отключении электроэнергии осуществлять быстрый ее запуск от резервного дизеля.

Проведенные исследования [1] показывают, что в зависимости от заданного изменения температуры продукта и начального значения скорости исполнительного органа электропривода существует двенадцать оптимальных по быстродействию диаграмм изменения температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения.

Оптимальная по быстродействию диаграмма первого вида изменения температуры продукта с ограничением третьей производной скорости ис-

полнительного органа электропривода при разгоне и при торможении, состоящая из шести этапов.

Оптимальная по быстродействию диаграмма второго вида изменения температуры продукта с ограничениями второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при разгоне и третьей производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из восьми этапов.

Оптимальная по быстродействию диаграмма третьего вида изменения температуры продукта с ограничениями второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при разгоне и при торможении, состоящая из десяти этапов.

Оптимальная по быстродействию оптимальная по быстродействию диаграмма четвертого вида изменения температуры продукта с ограничениями первой, второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при разгоне и третьей производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из десяти этапов.

Оптимальная по быстродействию диаграмма пятого вида изменения температуры продукта с ограничениями первой, второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при разгоне и второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из двенадцати этапов.

Оптимальная по быстродействию диаграмма шестого вида изменения температуры продукта с ограничениями первой, второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при разгоне и при торможении, состоящая из четырнадцати этапов.

Оптимальная по быстродействию диаграмма седьмого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее первой, второй и третьей производных при разгоне и

третьей производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из одиннадцати этапов.

Оптимальная по быстрдействию диаграмма восьмого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее первой, второй и третьей производных при разгоне и второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из тринадцати этапов.

Оптимальная по быстрдействию диаграмма девятого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее первой, второй и третьей производных при разгоне и первой, второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из пятнадцати этапов.

Оптимальная по быстрдействию диаграмма десятого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее второй и третьей производных при разгоне и третьей производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из девяти этапов.

Оптимальная по быстрдействию диаграмма одиннадцатого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее второй и третьей производных при разгоне и второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из одиннадцати этапов.

Оптимальная по быстрдействию диаграмма двенадцатого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее третьей производной при разгоне и третьей производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из семи этапов.

При разработке оптимальных по быстрдействию диаграмм изменения температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения силовая часть

аппарата представлялась системой дифференциальных уравнений четвертого порядка. При этом учитывались: электромеханическая постоянная времени электропривода; электромагнитная постоянная времени статора электродвигателя; электромагнитная постоянная времени ротора электродвигателя; постоянная времени, характеризующая динамику тепловых процессов в аппарате.

Первые девять видов оптимальных по быстродействию диаграмм изменения температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения подробно рассмотрены в статьях [2÷5]. Данная работа посвящена разработке десятого, одиннадцатого и двенадцатого видов оптимальных по быстродействию диаграмм изменения температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма десятого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее второй и третьей производных при разгоне и третьей производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из девяти этапов. На рисунке 1 приняты обозначения:

$w_{\max}^{(3)}$  - максимальное значение третьей производной скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с^4}$ ;

$w_{доп}^{(2)}$  - максимально допустимое значение второй производной скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с^3}$ ;

$w_{\max}^{(2)*}$  - максимальное значение второй производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении,  $\frac{рад}{с^3}$ ;

- $W_{\max}^{(1)}$  - максимальное значение первой производной скорости исполнительного органа электропривода при разгоне,  $\frac{рад}{с^2}$ ;
- $W_{\max}^{(1)*}$  - максимальное значение первой производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении,  $\frac{рад}{с^2}$ ;
- $W_{\text{нач}}$  - начальное значение скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с}$ ;
- $W_{\text{кон}}$  - конечное значение скорости исполнительного электропривода,  $\frac{рад}{с}$ ;
- $W_{\text{доп}}$  - максимально допустимое значение скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с}$ ;
- $\theta_{\text{нач}}$  - начальное значение температуры продукта на выходе аппарата воздушного охлаждения, °С;
- $\theta_{\text{кон}}$  - конечное значение температуры продукта на выходе аппарата воздушного охлаждения, °С.

Длительность этапов определяется по выражениям:

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{мах}}^{(3)}};$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}} - \omega_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{мах}}^{(3)}} \right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{мах}}^{(3)}};$$

$$t_{1*} = \sqrt[3]{\frac{\omega_{\text{доп}} - \omega_{\text{кон}}}{\omega_{\text{мах}}^{(3)}}};$$

$$t_3 = \tau \cdot \ln \frac{1 - F_1}{F_2 - 1},$$

где

$$F_1 = \left( 1 + 1 - \left\langle 1 - \left[ 1 - \left[ 1 + \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right) \cdot e^{-\frac{t_2}{\tau}} \right] \cdot e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right\} \cdot e^{-\frac{t_3}{\tau}} \right\rangle \cdot e^{-\frac{t_1}{\tau}} \cdot e^{-\frac{t_2}{\tau}} \right) \cdot e^{-\frac{t_1}{\tau}};$$

$$F_2 = \left[ 2 - \left( 2 - e^{-\frac{t_1^*}{\tau}} \right) \cdot e^{-\frac{2t_1^*}{\tau}} \right] \cdot e^{-\frac{t_1^*}{\tau}};$$

$\tau$  - постоянная времени, характеризующая динамику тепловых процессов в аппарате воздушного охлаждения, с.

Для диаграммы справедливы соотношения:

$$\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (t_1 + t_2);$$

$$\omega_{\max^*}^{(2)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_{1^*};$$

$$\omega_{\max^*}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_{1^*}^2.$$

На рисунке 2 представлена оптимальная по быстрдействию диаграмма одиннадцатого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее второй и третьей производных при разгоне и второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из одиннадцати этапов.



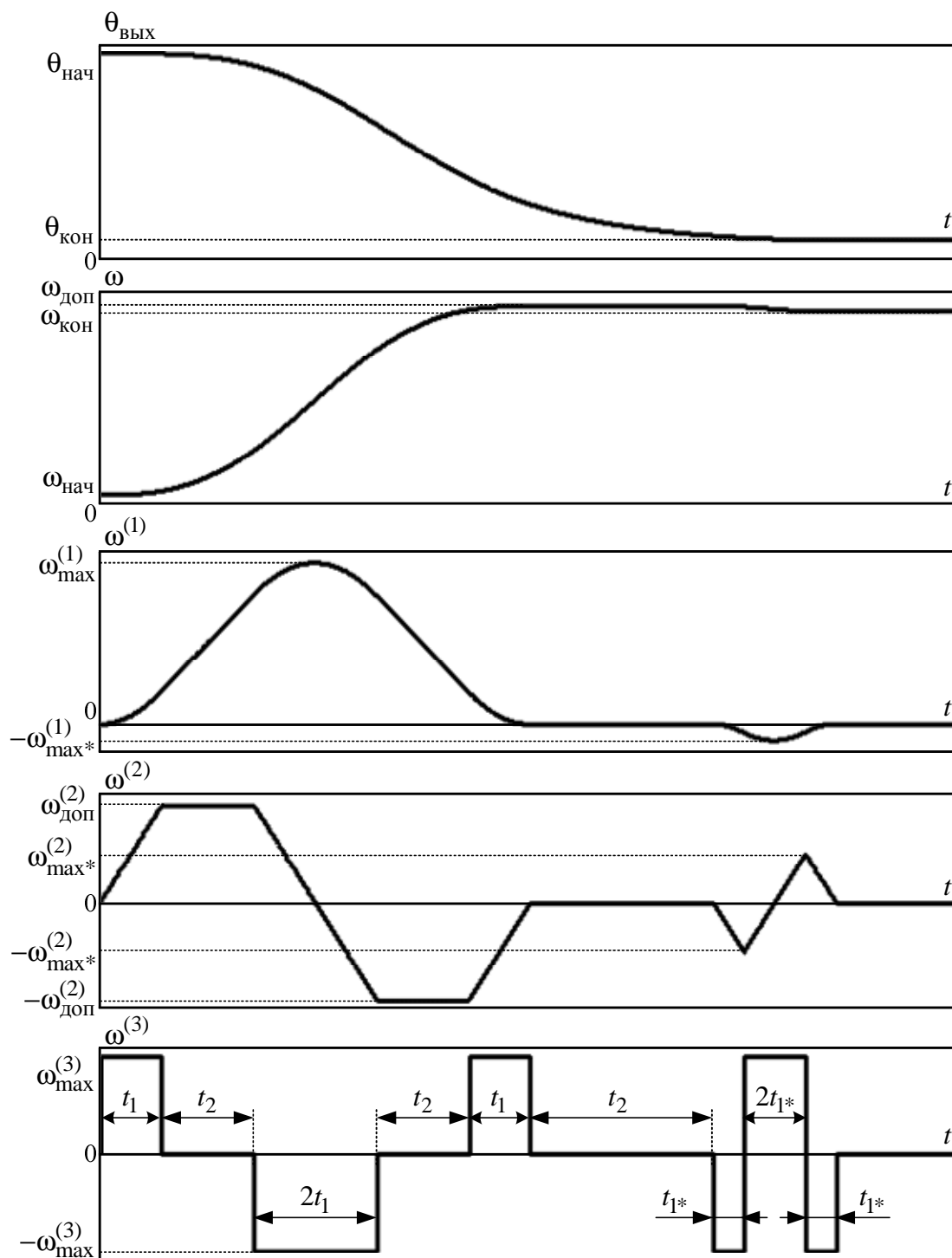


Рисунок 1 - Оптимальная по быстродействию диаграмма десятого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее второй и третьей производных при разгоне и третьей производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении

Длительности этапов определяются по выражениям:

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(3)}};$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}} - \omega_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(3)}}\right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(3)}}};$$

$$t_{2*} = \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}} - \omega_{\text{кон}}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(3)}}\right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(3)}}};$$

$$t_3 = \tau \cdot \ln \frac{1 - F_1}{F_3 - 1},$$

$$\text{где } F_3 = \left\langle 1 + \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right) \cdot e^{-\frac{t_{2*}}{\tau}} \right] \cdot e^{-\frac{2t_1}{\tau}} \right\} \cdot e^{-\frac{t_{2*}}{\tau}} \right\rangle \cdot e^{-\frac{t_1}{\tau}}.$$

Для диаграммы справедливы соотношения:

$$\omega_{\text{max}}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (t_1 + t_2);$$

$$\omega_{\text{max}*}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (t_1 + t_{2*}).$$

На рисунке 3 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма двенадцатого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее третьей производной при разгоне и третьей производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении, состоящая из семи этапов. На рисунке 3 в дополнении принято обозначение:

$w_{\text{max}}^{(2)}$  - максимальное значение второй производной скорости исполнительного органа электропривода при разгоне,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$ .

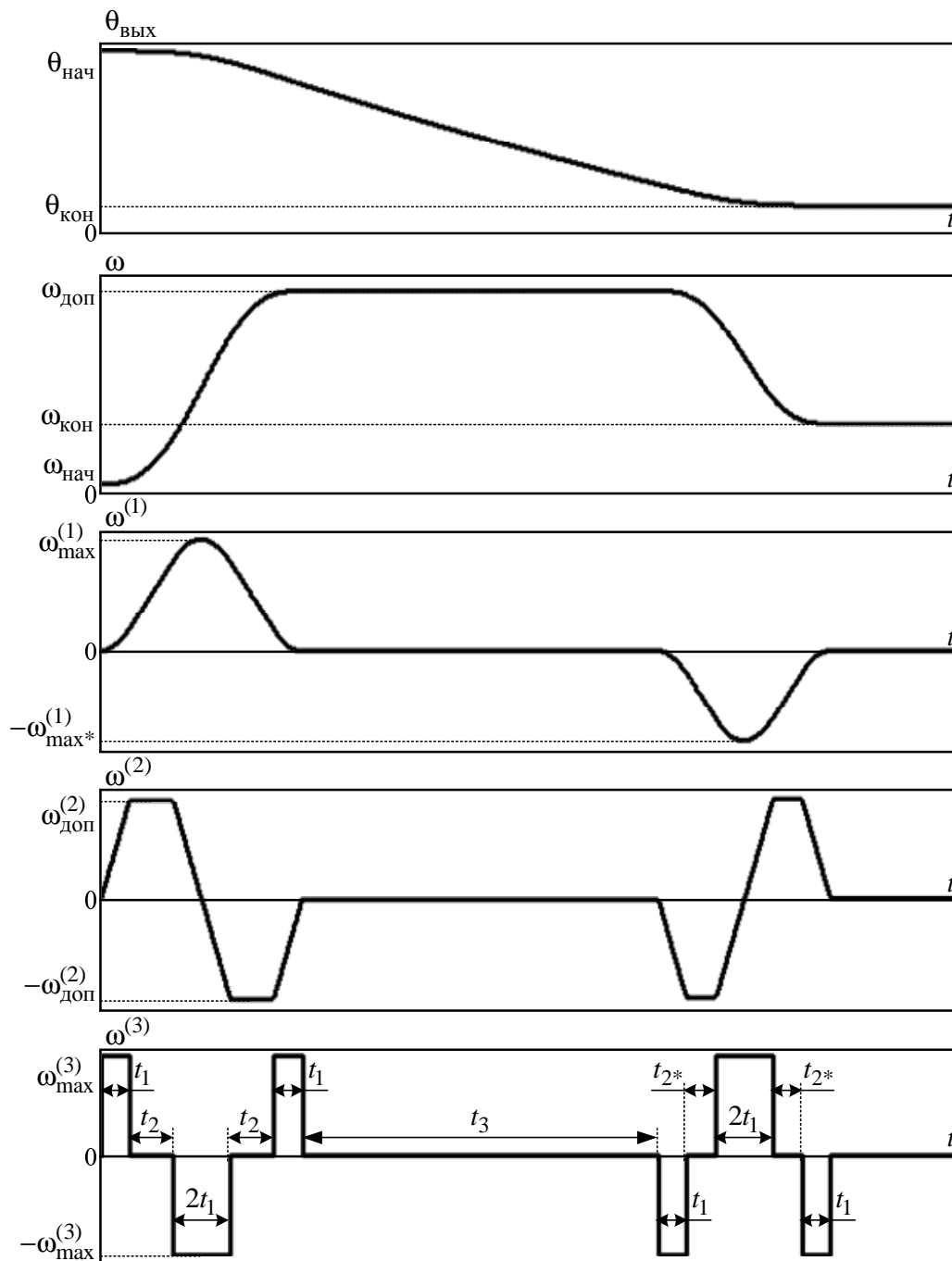


Рисунок 2 - Оптимальная по быстродействию диаграмма одиннадцатого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее второй и третьей производных при разгоне и второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода при торможении

Длительности этапов определяются по выражениям:

$$t_1 = 3 \sqrt[3]{\frac{\omega_{\text{доп}} - \omega_{\text{нач}}}{\omega_{\text{max}}^{(3)}}};$$

$$t_{1*} = 3 \sqrt[3]{\frac{\omega_{\text{доп}} - \omega_{\text{кон}}}{\omega_{\text{max}}^{(3)}}};$$

$$t_2 = \tau \cdot \ln \frac{1 - F_4}{F_2 - 1},$$

где 
$$F_4 = \left[ 2 - \left( 2 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right) \cdot e^{-2\frac{t_1}{\tau}} \right] \cdot e^{-\frac{t_1}{\tau}}.$$

Для диаграммы справедливы соотношения:

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{\text{max}}^{(1)} = \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_{\text{max}*}^{(2)} = \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_{1*};$$

$$\omega_{\text{max}*}^{(1)} = \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_{1*}^2.$$

На рисунках 1-3 приведены зависимости: температуры продукта на выходе аппарата воздушного охлаждения  $\theta_{\text{вых}}$  от времени  $t$ ; скорости исполнительного органа электропривода  $\omega$  от времени  $t$  первой производной скорости исполнительного органа электропривода  $\omega^{(1)}$  от времени  $t$ ; второй производной скорости исполнительного органа электропривода  $\omega^{(2)}$  от времени  $t$ ; третьей производной скорости исполнительного органа электропривода  $\omega^{(3)}$  от времени  $t$ .

В статье рассмотрены оптимальные по быстродействию диаграммы уменьшения температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения. Проведенные исследования справедливы для оптимальных по быстродействию диаграмм увеличения температуры продукта в аппарате воздушного

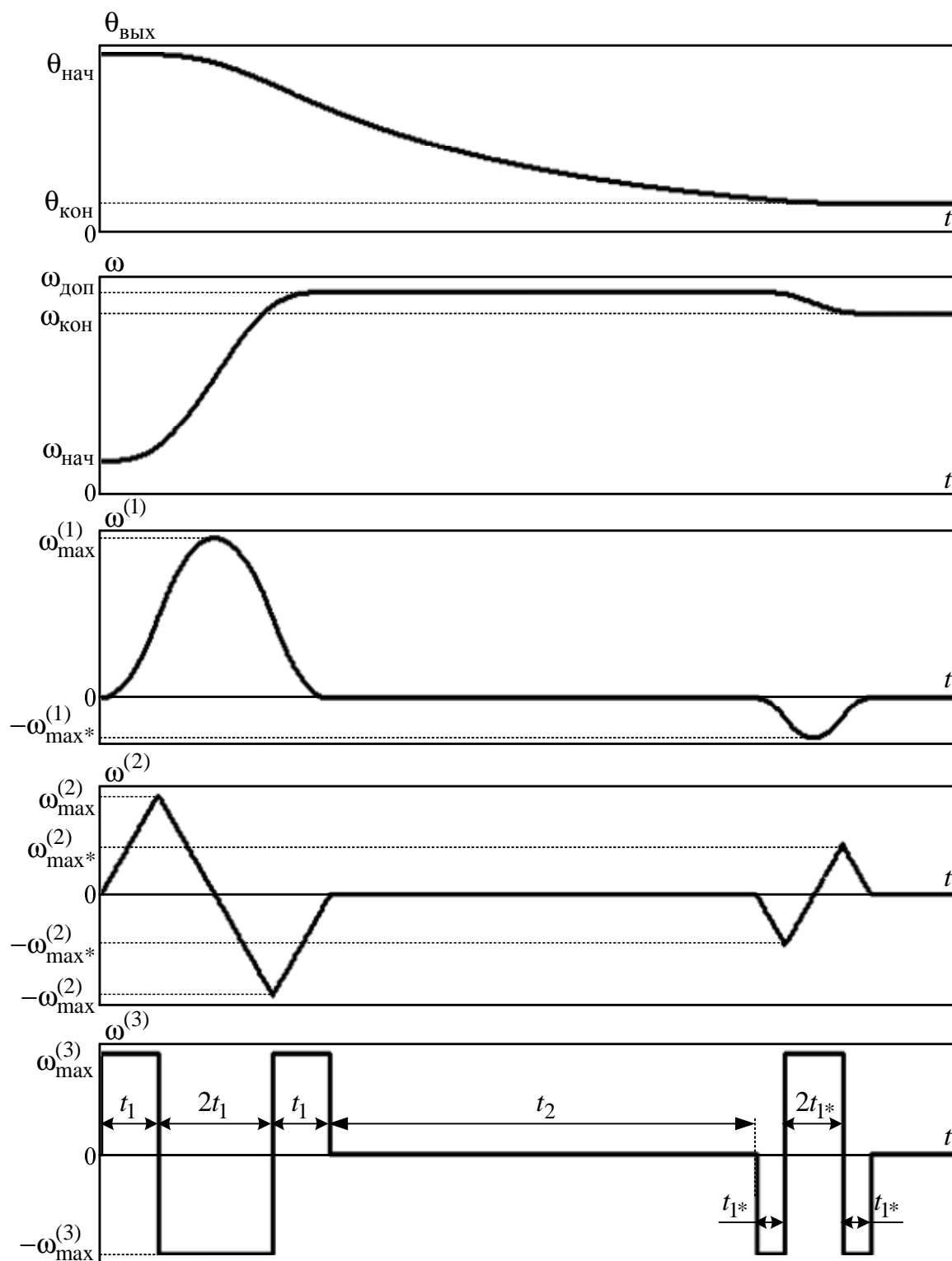


Рисунок 3 - Оптимальная по быстродействию диаграмма двенадцатого вида изменения температуры продукта с ограничениями скорости исполнительного органа электропривода и ее третьей производной при разгоне и третьей производной скорости исполнительного органа электропривода при торможении

охлаждения. При этом в математических зависимостях следует заменить величину  $\omega_{\text{доп}}$  на ноль, а перед величинами  $\omega_{\text{нач}}$  и  $\omega_{\text{кон}}$  поменять знаки.

### **Выводы**

Так как электротехническая часть аппарата воздушного охлаждения представлена системой дифференциальных уравнений четвертого порядка, а зависимости изменения температуры продукта зависят от заданного её изменения и начального значения скорости исполнительного органа электропривода вентилятора, то существуют двенадцать оптимальных по быстродействию диаграмм изменения температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения.

В статье разработаны три диаграммы изменения температуры продукта в аппаратах воздушного охлаждения и определены их параметры (девять диаграмм изменения температуры продукта в аппаратах воздушного охлаждения опубликованы ранее /2-5/).

Полученные результаты позволяют перейти к следующей задаче исследований – разработке систем автоматического регулирования температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения.

### **Список литературы**

1. Добробаба Ю.П., Шаповало А.А. Разработка оптимальных по быстродействию диаграмм изменения температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения. Материалы II международной научной конференции “Технические и технологические системы” Краснодар, 2010, С. 172-175.
2. Добробаба Ю.П., Шаповало А.А. Разработка оптимальной по быстродействию диаграммы для малых изменений температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения. Изв. ВУЗов “Пищевая технология”, 2009, №5-6, С. 74-76.
3. Добробаба Ю.П., Шаповало А.А. Разработка оптимальных по быстродействию диаграмм для небольших изменений температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения. Изв. ВУЗов “Пищевая технология”, 2010, №1, С. 76-79.
4. Добробаба Ю.П., Шаповало А.А. Разработка оптимальных по быстродействию диаграмм для средних изменений температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения. Изв. ВУЗов “Пищевая технология”, 2010, №2-3, С. 82-85.
5. Добробаба Ю.П., Шаповало А.А. Разработка оптимальных по быстродействию диаграмм для больших изменений температуры продукта в аппарате воздушного охлаждения. Изв. ВУЗов “Пищевая технология”, 2010, №4 С. 82-85.